心理科学进展 2018, Vol. 26, No. 6, 994–1003
Advances in Psychological Science DOI: 10.3724/SP.J.1042.2018.00994

语言认知神经科学研究中的脑沟形态分析*

崔 新[1] 苏萌萌[2] 舒 华[1]
([1]北京师范大学认知神经科学与学习国家重点实验室，北京 100875)
([2]首都师范大学初等教育学院，北京 100048)

摘 要 语言是人类最重要的能力，神经影像学通过多种方式探讨其神经生理学基础。近年来，精神和神经疾病患者中报告了脑沟形态异常，启发研究者进一步探讨皮层表面精细形态特征与语言等认知能力的关系。我们总结了脑沟形态分析的主要方法，并探讨了其在语言认知神经科学中的应用现状及今后可能的研究方向。通过整合脑沟形态及多模态数据，能够帮助研究者全面理解语言认知能力和大脑结构的关系。

关键词 语言认知；脑沟；障碍
分类号 B842; B845

1 引言

神经影像学技术的发展为研究者提供了丰富的大脑形态学测度。例如，基于体素的形态分析法(Voxel-based morphometry, VBM)通过量化灰质和白质，寻找有助于疾病早期诊断的生物标记(Ashburner & Friston, 2000)。随着技术的进一步发展，研究者开始关注更加精细的大脑形态测度，越来越多的研究者将灰质体积细分为皮层厚度和皮层表面积，进而探讨不同维度的脑结构指标与认知能力的相互关联(Panizzon et al., 2009)。

近年来，研究者开始关注皮层表面的形态特征，脑沟是其中最具代表性的一种。已有的理论假设和研究结果认为脑沟形态并非任意分布，而是底层生理组织建构以及发展的宏观表征(Mangin, Jouvent, & Cachia, 2010)。具体表现在，首先，脑沟形成与遗传因素联系紧密。脑沟和脑回在胎儿10至16孕周显现，妊娠晚期已经出现与成人类似的皮层表面形态(Armstrong, Schleicher, Omran, Curtis, & Zilles, 1995)，而异常的遗传因素会导致脑沟形态的变化(Fahim et al., 2012)。其次，脑沟形态可能反映了皮层下的纤维连接方式(van Essen, 1997; Hilgetag & Barbas, 2005)，有研究报告了脑回指数(gyrification index)和皮层下白质纤维束的各向异性(fractional anisotropy, FA)存在相关(Melbourne et al., 2014)。此外，脑沟形态并非完全由灰质等其他形态测度决定。Trefler等人(2016)发现，一天的不同时间段(time-of-day, TOD)，个体的皮层表面积、皮层厚度和灰质密度等指标会发生改变，而脑沟深度则不会受到TOD的影响，并且脑沟空间分布在发展过程中也保持相对稳定(Cachia et al., 2016)。

脑沟形态的特点契合了语言认知研究对神经生物表型的需要。一方面，脑沟形态发生发展时间早，为探究语言能力的产生及语言功能的偏侧化提供了显著的形态学标志(Habas et al., 2012; Kersbergen et al., 2016)；另一方面，语言能力与遗传因素(Platt et al., 2013)、白质纤维(Dubois et al., 2016; Hagoort, 2014)存在密切关系，脑沟形态同时受到遗传因素和白质纤维的影响，从而为探究语言能力的底层神经机制提供了皮层水平的宏观特征。目前的研究，从认知层面考察脑沟特征的研究还相对较少，对语言认知及其发展性障碍(例如阅读障碍)的研究就更为不足。然而，语言认知及其发展性障碍的病因学研究是人们关注的焦点，研究者试图从遗传、环境、脑机制等层面全方位探讨语言认知能力的发展。脑沟，这一与遗

收稿日期：2017-02-22
* 国家自然科学基金项目(31671126, 31611130107)，北京市科学技术委员会基金(Z151100003915122)和北京师范大学学科交叉建设项目支持。
通信作者：舒华, E-mail: shuhua@bnu.edu.cn

传、白质纤维等密切相关的形态学特征，能够为深入理解语言能力的正常与异常发展提供新的视角。综上所述，本文将首先介绍脑沟形态分析的方法，然后综述脑沟形态与语言能力有关的重要发现并展望未来可能的研究方向。

2　脑沟形态分析的方法

2.1　皮层复杂程度的量化

最早尝试量化皮层表面特征的指标是脑回指数(gyrification index, GI) (Zilles, Armstrong, Schleicher, & Kretschmann, 1988)，即二维脑成像图片(slices)中大脑内部周长(脑沟内的轮廓线长度)与外周周长的比值。随着图像处理技术的发展，基于 vertex 计算的三维脑回指数在孤独症(Kates, Ikuta, & Burnette, 2009)、精神分裂(Harris et al., 2007)、双相障碍(Mirakhur et al., 2009)等精神疾病的研究中得到了应用。

$$\text{Gyrification Index} = \frac{\text{Length of Inner Contour}}{\text{Length of Outer Contour}}$$

在脑回指数的基础上，Cachia 等人(2008)提出了脑沟指数(sulcal index, SI)的概念。脑沟指数包括总体脑沟指数(global sulcal index, g-SI)和局部脑沟指数(local sulcal index, l-SI)。总体脑沟指数指每个半球所有脑沟表面积和外部皮层表面积的比值；局部脑沟指数指感兴趣区域(region of interest, ROI)内所有脑沟表面积和外部皮层表面积的比值。脑沟指数没有考虑灰质信号，因此可以减少一些无关因素如药物(Penttilä et al., 2008)对结果的影响。研究者发现异常的脑沟指数与幻听型精神分裂(Cachia et al., 2008)，早发型精神分裂(Penttilä et al., 2008)有关。此外，脑沟指数与老年人的注意、加工速度、记忆及语言等认知能力相关(Liu et al., 2011, 2013)。

尽管脑沟指数(SI)和脑回指数(GI)在计算方法上存在差异，实际上均是对皮层复杂程度的量化，并已经在神经疾病、认知能力的研究中积累了大量研究成果。但是，复杂程度的分析仍不能确定脑沟形态的哪些方面发生了变化，因此需要进一步量化目标脑沟的特征。

2.2　目标脑沟分析

Mangin 等人(2004)提出新的算法：等位侵蚀技术(homotopic erosion technique)和裂隙探测器(crevasse detector)，自动识别 T1 加权像中的脑沟。两种算法基于 T1 加权像，将图像分割为包含属性邻接图(attributed relational graph, ARG)的简单曲面(simple surfaces, SSs)，属性邻接图中综合了识别脑沟需要的所有信息。目标脑沟分析的主要步骤包括：预处理 MR 图像；分割大脑组织(包括脑脊液、灰质和白质)；在灰质与脑脊液界面分割脑沟并转换为脑沟曲面；最后识别并命名脑沟(Sun, Rivière, Poupon, Régis, & Mangin, 2007)。目前已有软件包 BrainVISA (http://brainvisa.info/) (Geffroy et al., 2011)能够实现上述一系列处理过程(图 1)，处理之后可以得到定量的脑沟形态信息(表面积、长度、深度)，还可以定性分析脑沟的空间组织特征(相对位置和相对方向)。

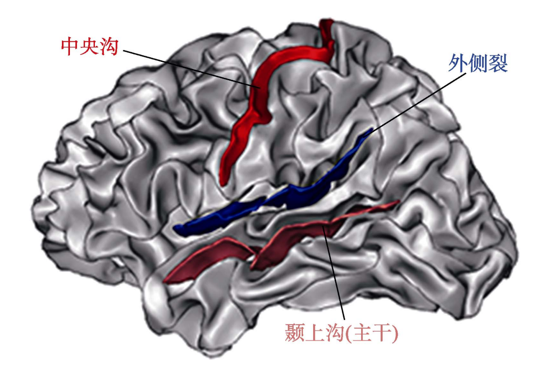


图 1　个体左半球的三条主要脑沟，分别为中央沟(上)、外侧裂(中)、颞上沟(下)。
注：脑沟呈现在 white surface 上；图中隐藏了其他脑沟；颞上沟仅有主干部分，未显示其分支。彩图见电子版。

目标脑沟形态的定量特征。脑沟曲面由外部边界顶脊(top ridge)，内部边界底脊(bottom ridge)和面(surface)组成，其中“面”由相对的脑回“河床”(gyral banks)之间确定。顶脊和底脊的交叉点为面的终结点，以顶脊和底脊包围的面重构脑沟曲面。脑沟的表面积为脑沟曲面中“面”的面积。进一步地，脑沟曲面的线性测度：长度和深度，分别由温度扩散模型(heat diffusion model)量化(Kochunov et al., 2010)。脑沟长度定义为沿着脑沟曲面排列的 100 段等温曲线长度的均值，方向与脑沟底脊和顶脊共线；脑沟深度的定义为沿脑沟曲面排列的 100 段曲线的均值，方向垂直于底脊和顶脊的连线。

目标脑沟的定性特征。脑沟空间组织(相对位置和相对方向等)分析通常包括中断情况、脑沟之间是否相互连接，脑沟末端的走向等。研究者要

求多个评估者分别利用相同的编码表评估每个被试的脑沟形态，以评估的一致性程度确定脑沟的空间组织特征。以中断为例，Borst 等人(2016)让 3 位研究者分别使用二分变量编码(dichotomous variable code)评估儿童的颞枕沟(occipitotemporal sulcus, OTS)类型，评估者之间的一致性达到 100%即可确定个体的颞枕沟类型为中断或连续。目标脑沟的定性分析还应用于威廉姆斯综合症(Williams Syndrome, WS)患者的研究，威廉姆斯综合征患者右侧颞平面显著大于控制组，其原因是患者右半球外侧裂水平延伸而不是上升到顶叶(Eckert et al., 2006)；还有研究发现颞上沟(superior temporal sulcus, STS)的中断数量存在左右半球的差异，这种结构不对称可能和语言偏侧化相关(Ochiai et al., 2004)。

2.3 脑沟模式分析

脑回指数和脑沟指数能够宏观量化脑沟复杂程度，目标脑沟分析旨在对特定脑沟形态进行描绘，这两种方法都无法量化多个脑沟的空间位置和排列关系。因此研究者提出了脑沟模式(sulcal pattern)的概念，即脑沟的拓扑特征。

Lohmann, von Cramon 和 Colchester (2008)分析了脑沟深部的特点，发现脑沟深部比浅层表现出较少的个体差异。每条脑沟沿其底部通常都能够发现界限清楚的最大深度区域脑沟凹陷(sulcal pit)。Im 等人(2010)发展出了基于脑沟凹陷建构脑沟模式的方法，使用流域算法(watershed algorithm)，将皮层分割为多个盆地(basin)，修剪较浅和较小的盆地之后，每个盆地的最深处被标记为脑沟凹陷，每个脑沟凹陷在图形表征中作为一个节点(node)，如果脑沟盆地相邻则使用无方向的边(edge)相连，从而在选定的区域内得到脑沟图形(sulcal graph)。脑沟图形中主要包含节点的几何特征(三维空间位置和脑沟盆地面积)，节点之间的几何关系(反映脑沟之间的关系)以及节点的数量和节点间的路径(图形间的拓扑特征)。

研究者发现同卵双生子的脑沟模式相似程度显著高于样本内随机两个个体间的脑沟模式(Im et al., 2011)，表明脑沟模式与遗传因素之间存在密切联系；此外，在多小脑回(Polymicrogyria, PMG)患者中，完整语言能力患者和语言能力损伤患者相比，顶叶脑沟模式与正常控制组更相似(Im, Pienaar et al., 2013)；还有研究报告了发展性阅读障碍儿童和家族风险儿童与其控制组相比，枕颞区域(parieto-temporal region)及顶颞区域(occipito-temporal region)脑沟模式出现异常(Im, Raschle, Smith, Ellen Grant, & Gaab, 2016)。

3 脑沟形态分析在语言认知领域的研究进展

3.1 脑沟形态的早期发展轨迹

儿童语言的早期发展为后期阅读乃至社会认知的发展奠定了基础(Catts, Fey, Ellis Weismer, & Bridges, 2014)。揭示语言相关脑结构的早期发展轨迹能够帮助我们深入理解人类语言发展的底层神经机制。作为衡量大脑早期发育的重要指标，脑沟形态分析在早期语言发展中的应用受到研究者关注(Kersbergen et al., 2016)。

脑沟和脑回的形成能够在有限空间内尽可能扩展皮层表面积(Striedter, Srinivasan, & Monuki, 2015)。妊娠的 3 个月末期，神经元开始最后的迁移并形成连接，与此同时，平滑的皮层表面开始形成复杂的脑沟和脑回。初级脑沟(primary sulci)很快延长和分支并形成二级(secondary sulci)和三级脑沟(tertiary sulci)，最终出生时皮层表面形成类似成人的复杂形态(Tallinen et al., 2016)。

研究者采用不同的方法描绘了 18 孕周到 2 岁时期脑沟形态的发展过程，并在外侧裂周区发现了显著的皮层变化。Kasprian 等人(2011)采集了 197 名宫内胎儿(18~37 孕周)的 MR 图像，基于二维 MR 图像的冠状面，描绘每个胎儿大脑的轮廓线，以轮廓线变异代表脑沟的复杂程度。结果发现超过 2/3 的胎儿表现出更大的左侧颞叶，94%的胎儿右侧颞上沟(23 孕周出现)比左侧颞上沟(25 孕周出现)出现的更早，并且右侧深于左侧。Dubois, Benders 和 Borradori-Tolsa 等人(2008)从 35 名早产儿(26~36 孕周)MR 图像中重构了皮层(surface)，并定义脑沟指数用于量化分析个体脑沟形态的复杂程度，研究者发现额叶、颞叶等不同区域的脑沟指数存在差异，而右半球比左半球更早的表现出复杂的脑沟形态。Habas 等人(2012)基于皮层局部曲率，描绘了宫内胎儿的脑沟形态发展。结果表明主要脑沟的出现时间存在差异，外侧裂(Sylvian fissure)最早出现曲率变化；颞上沟在 24 周左右显现，而右侧颞上沟比左侧提早 1 周出现。出生后 2 年，大脑经历了发展最快的阶段，体积和表面积

迅速增加(Gilmore et al., 2007)。Li 等人(2014)追踪了出生到 2 岁婴儿的脑沟形态变化, 发现从出生到 2 岁颞上沟和顶枕沟右侧深度大于左侧, 而颞平面的大小和深度左侧大于右侧的现象。此外, 研究者还发现颞上沟和颞平面在成人和新生儿群体间表现出类似的偏侧化模式(Hill et al., 2010)。

婴儿大脑是目前唯一能够精通语言的“机器” (Dehaene-Lambertz & Spelke, 2015), 早期脑沟形态的发展轨迹与语言能力的关系主要表现在外侧裂周区(peri-sylvian region)的形态改变。事实上, 30 孕周左右的早产儿已经具有区分音节的能力(Mahmoudzadeh, Wallois, Kongolo, Goudjil, & Dehaene-Lambertz, 2017), 有研究发现早产儿等价足月出生时期(term-equivalent age, TEA)的外侧裂形态与其 2 岁时的接受性语言有关(Kersbergen et al., 2016), 这些证据表明胎儿时期外侧裂周区的脑沟形态变化可能与婴儿的语言获得和发展存在密切联系。此外, 外侧裂周区中, 颞叶脑沟形态变异较大(Leroy et al., 2011), 并且颞上沟在不同研究中报告了一致的发展进程, 这种结构变化可能支持了认知功能的发展。从出生后的语言功能来说, 婴儿和成人的颞叶皮层对于语音刺激表现出相似的功能激活(Dehaene-Lambertz, 2017; Shultz, Vouloumanos, Bennett, & Pelphrey, 2014), 因此颞叶尤其是颞上沟的早期形态变化可能对于语言能力有重要作用。

3.2　脑沟形态与语言偏侧化

人类最明显的大脑功能偏侧化为语言功能的偏侧化(Sun & Walsh, 2006), 一直以来, 研究者试图找到人类大脑独特的结构特征, 以解释人类的认知成就。颞平面(planum temporale, PT)和言语功能密切相关, 有研究报告了颞平面表面积的偏侧化现象(Lyttelton et al., 2009), 但并非所有研究都发现了这种偏侧化特征(Dorsaint-Pierre et al., 2006; Keller, Crow, Foundas, Amunts, & Roberts, 2009)并且灵长类动物中也报告了相似的现象(Hopkins & Nir, 2010)。随着量化方法的提出, 研究者尝试寻找人类独特的脑沟偏侧化特征。

语言偏侧化的脑沟形态研究集中在脑沟凹陷上。脑沟凹陷是脑沟局部最深处, 被认为是大脑中形态变化的起始点, 并且其分布在个体间相对稳定(Lohmann, von Cramon, & Colchester, 2008; Régis et al., 2005)。Im 等人(2010)从 148 名成年中提取了脑沟凹陷, 分别在左右半球发现了 48 个和 47 个脑沟凹陷团块(clusters), 脑沟凹陷的密度和空间分布表现出较小的个体差异, 并在颞上沟表现出数量和空间分布的半球间偏侧化现象。Meng, Li, Lin, Gilmore 和 Shen (2014) 进一步追踪了 0~2 岁婴儿的脑沟凹陷发展, 发现了类似成人的脑沟凹陷分布, 并且这种分布在出生后两年内保持相对稳定。研究者还发现, 婴儿和成人颞上沟的脑沟凹陷分布具有一致的偏侧化模式(Auzias, Brun, Deruelle, & Coulon, 2015; Im et al., 2010)。Leroy 等人(2015)通过分析不同年龄人类和黑猩猩的 MR 图像, 进一步确定了人脑特有的左右不对称区域(右侧显著深于左侧), 将其命名为颞上不对称凹陷(superior temporal asymmetrical pit, STAP)。

颞上沟深度的偏侧化可能为语言能力的偏侧化提供支持。首先, 颞上沟本身对语言能力有着重要作用, 左半球颞上沟特别地对言语刺激敏感(DeWitt & Rauschecker, 2012), 而发展进程上, 左侧颞上沟比右侧更晚出现, 这种左侧发育延迟, 可能为处理语言和运动刺激提供了更充分的结构可塑性(Dubois, Benders, Cachia et al., 2008)。不仅如此, 皮层下白质连接可能是脑沟形成的原因之一(Xu et al., 2010), 而颞叶皮层下存在复杂的白质纤维连接, 其中之一的弓形束(arcuate fasciculus, AF)与颞上不对称凹陷在发展中表现出相似的特征: 第一, 人类的弓形束和颞上不对称凹陷远大于黑猩猩; 第二, 两者在生命早期均出现了偏侧化现象(Dubois et al., 2009)。因此颞上不对称凹陷可能与皮层下的白质纤维密度以及偏侧化发展有关。鉴于弓形束在语音加工(Vandermosten, Boets, Wouters, & Ghesquière, 2012)和词汇阅读(Gullick & Booth, 2015)中的重要作用, 颞上不对称凹陷很可能和语言认知能力密切相关。尽管颞上不对称凹陷的功能尚不明确, 但其处于言语腹侧通路音-义对应的核心区域(Liebenthal et al., 2010; Striem-Amit, Hertz, & Amedi, 2011), 并且黑猩猩中未发现这一结构, 因此研究者推测与颞平面相比, 颞上不对称凹陷可能是更加人类特异的偏侧化结构。

脑沟凹陷表现出了显著偏侧化现象和高遗传度(Takerkart, Auzias, Brun, & Coulon, 2017), 为进一步探索大脑结构偏侧化与语言功能偏侧化之间的关系提供新的形态学测度。同时, 脑沟凹陷也是可靠的解剖标志(anatomical landmark) (Li, Guo,

Nie, & Liu, 2010)，个体 MR 图像中提取的脑沟凹陷在不同扫描仪、扫描序列和皮层重构工具之间具有很高的稳定性(Im, Lee et al., 2013)。因此，研究者能够基于脑沟凹陷建立脑沟模式，进一步分析脑沟拓扑特征与认知能力之间的关系。

3.3　脑沟形态与发展性阅读障碍

阅读是语言认知研究最重要的方面之一，阅读能力是儿童多项能力发展的基石。发展性阅读障碍(Developmental Dyslexia，DD)是学龄期儿童常见的一种学习障碍，通常为智力、感知能力以及动机正常并且接受了充分教育的个体，在准确流利识别字词或拼写时出现困难(Peterson & Pennington, 2012)。发展性阅读障碍的病因学基础仍处于争论之中，有研究认为风险基因和异常的神经发育导致发展性阅读障碍的发生(Skeide et al., 2016)，而另一些研究发现发展性阅读障碍大脑的功能和结构异常来源于缺乏阅读经验(Clark et al., 2014; Olulade, Napoliello, & Eden, 2013)。

为了解决这一争论，一种方法是加入新对照组(Xia, Hoeft, Zhang, & Shu, 2016)，通过比较阅读障碍组、年龄控制组和阅读水平控制组来解释 DD 脑结构异常的原因；另一种方法是招募学前儿童(Raschle et al., 2017; Raschle, Stering, Meissner, & Gaab, 2014; Vandermosten et al., 2015; Wang et al., 2017)。学前儿童尚未接受系统的阅读训练，通过比较阅读障碍家族风险儿童和年龄控制组，能够发现相对独立于阅读经验的大脑功能和结构异常。Raschle, Chang 和 Gaab (2011), Raschle 等人(2017)报告了学前 DD 风险儿童，枕颞区域和颞顶区域灰质体积的下降，这表明 DD 的大脑结构异常可能在学习阅读之前已经存在。

最新一项研究中，Im 等人(2016)对 DD 儿童及其年龄控制组和学前 DD 风险儿童及其年龄控制组的脑沟模式进行了比较。研究者基于枕颞和顶颞区域的脑沟凹陷建立脑沟图形，每个正常被试与其他正常被试之间计算一个平均相似度 S'_T(i)，每个 DD 和所有正常被试计算一个平均相似度 $S'_{T,D}$(i)，通过比较 S'_T 和 $S'_{T,D}$ 可以得到 DD 与正常控制组的组间差异(S'_T vs. $S'_{T,D}$)。同理可以比较风险儿童和非风险儿童之间的相似度(S'_{F-F+} vs. S'_{F-})。结果表明 DD 儿童与正常儿童相比以及学前风险儿童和非风险儿童相比，均表现出脑沟模式的显著差异；脑沟模式的跨年龄比较中，非风险儿童和学后正常儿童表现出了较高一致性，而学前风险儿童和 DD 表现出了较高的一致性。脑沟相似度和行为成绩的相关表明，DD 脑沟模式与控制组相似度越高，其词汇和语言加工测验的成绩越好。

鉴于脑沟模式出生时已经基本形成，阅读障碍儿童、风险儿童和其对应控制组的脑沟模式差异可能反映了早期大脑结构存在的异常，甚至可能追溯到胎儿发育时期。研究者推测异常的脑沟模式可能受到异常遗传因素和皮层下白质连接的影响。首先，DD 风险基因(如 DCDC2, KIAA0319)等对于大脑发展尤其是神经元迁移有着重要作用(Peterson & Pennington, 2012)，神经元的迁移是脑沟形成的影响因素之一(Striedter et al., 2015)，发育早期风险遗传因素可能会通过影响神经元迁移，进而导致脑沟模式的异常。其次，皮层下白质纤维束的密度和张力可能驱动了脑沟形成(Zilles, Palomero-Gallagher, & Amunts, 2013)。枕颞皮层的视觉词汇加工区(visual word form area, VWFA)对于阅读有着重要作用(Bouhali et al., 2014; Dehaene, Cohen, Morais, & Kolinsky, 2015)，而有证据表明阅读学习之前的白质纤维连接支持了 VWFA 的产生(Saygin et al., 2016)，因此，学前风险儿童枕颞脑沟模式的差异可能反映了发展早期白质连接的异常。近期 Williams, Juranek, Cirino 和 Fletcher (2017)报告了 DD 左侧枕颞区域脑回指数的增加，研究者推测增加的皮层复杂程度可能反映了皮层局部信息交换能力的提升，但同时以长距离连接(如下额枕束等)减弱为代价，从而影响了 DD 的阅读能力。

正常群体的研究同样在枕颞区域发现了脑沟形态与阅读能力之间存在关联。左侧枕颞沟的空间分布和阅读准确性相关(Cachia et al., 2017)，而脑沟的空间分布被认为在出生前已经形成并且较少受到出生后神经可塑性的影响(Cachia et al., 2016)，研究者推测左侧枕颞沟和阅读能力的关系可能反映了皮层细胞构筑(Cytoarchitecture)和皮层下白质纤维连接对于阅读能力的影响(Dubois et al., 2016; Weiner et al., 2017)。

总之，异常群体和正常群体的脑沟形态研究为探讨早期大脑发育与语言认知能力之间的关系提供了初步证据。同时，脑沟的发生发展机制与编码蛋白质的基因、微核糖核酸(microRNA)等因

素密切联系(Sun & Hevner, 2014), 为探讨语言发展及障碍的遗传学机制提供了新的中介表型。

4　总结与展望

Klee 和 Stokes (2011)提出的语言发展模型中包含了遗传因素、环境刺激、神经生物基础、认知机制等多种成分和过程, 语言的发展并非单一因素决定而受到多种过程的影响。脑沟形态为研究者提供了更加精细的神经生物学指标, 已有研究表明其在语言认知研究中的应用潜力: 首先, 早期脑沟形态变化显著, 能够作为发育早期的神经影像学指标, 探讨语言认知能力与大脑结构发展及遗传因素的关系(Sun et al., 2005); 其次, 脑沟凹陷的偏侧化可能提供了语言功能偏侧化的结构基础, 支持了语言认知理论的模型; 最后, 脑沟模式及脑沟的空间分布较少受到出生后神经可塑性的影响, 为揭示发展性阅读障碍等认知缺陷的病因学基础提供了更接近遗传因素的形态学测度。

事实上, 脑沟形态分析在神经和精神疾病中已经有了广泛的应用, 如孤独症(Libero, DeRamus, Deshpande, & Kana, 2014; Wallace et al., 2013), 威廉姆斯综合征(Fahim et al., 2012), 强迫症(Shim et al., 2009), 口吃(Cykowski et al., 2008), 阿尔兹海默症(Hamelin et al., 2015)等。这些脑沟形态异常通常与遗传和神经发育的扰动有关, 反映了疾病早期的病理学特征, 为探讨神经及精神疾病的病因学基础, 关联认知损伤与大脑结构异常以及预测疾病发生发展提供了早期生物标志。

相比较而言, 脑沟形态在语言认知领域内的应用正处于起步阶段, 仍有很多问题有待进一步研究。首先, 脑沟形态与遗传因素的关系。相关问题包括, 语言相关的遗传因素影响了哪些脑沟形态特征, 及早期脑沟形态的偏侧化是否与这些基因表达有关等。第二, 脑沟形态与语言等认知能力之间的关系。脑沟本身并不包含神经元, 也不承担特定认知功能, 因此, 研究者面临相继的两个问题, 首先, 脑沟形态是否与语言认知能力相关; 其次, 假设相关存在, 脑沟形态反映了何种生理过程进而影响语言认知能力。这些问题需要研究者基于脑沟的发生发展机制及细胞构筑等研究谨慎推测。第三, 脑沟形态与后天发展和环境。大脑在出生后仍不断发展, 儿童及青少年时期是个体认知能力发展的关键时期, 这一时期语言发展和脑沟形态发展轨迹之间存在何种关系尚不明确, 而成熟过程和后天环境因素如何塑造脑沟形态仍有待研究。阐明脑沟形态与遗传、认知和环境三者的相互作用, 有助于研究者深入了解语言发展认知神经机制。此外, 语言认知研究应考虑到文化差异的影响, 来自不同国家地区的大样本研究有助于发现语言能力和脑沟形态的关联, 抑或探讨不同文化背景下群体之间可能存在的差异。最后, 脑沟形态分析方法的优化能够提供更加丰富神经影像指标, 为揭示发展性阅读障碍的病因学基础, 探索遗传因素与语言发展及语言障碍之间的关系, 并进一步为建立发展性阅读障碍等语言障碍的早期诊断模型提供支持。

参考文献

Armstrong, E., Schleicher, A., Omran, H., Curtis, M., & Zilles, K. (1995). The ontogeny of human gyrification. *Cerebral Cortex, 5*(1), 56–63.

Ashburner, J., & Friston, K. J. (2000). Voxel-based morphometry—the methods. *NeuroImage, 11*(6), 805–821.

Auzias, G., Brun, L., Deruelle, C., & Coulon, O. (2015). Deep sulcal landmarks: Algorithmic and conceptual improvements in the definition and extraction of sulcal pits. *NeuroImage, 111*, 12–25.

Borst, G., Cachia, A., Tissier, C., Ahr, E., Simon, G., & Houdé, O. (2016). Early cerebral constraints on reading skills in school-age children: An MRI study. *Mind, Brain, and Education, 10*(1), 47–54.

Bouhali, F., de Schotten, M. T., Pinel, P., Poupon, C., Mangin, J. F., Dehaene, S., & Cohen, L. (2014). Anatomical connections of the visual word form area. *Journal of Neuroscience, 34*(46), 15402–15414.

Cachia, A., Borst, G., Tissier, C., Fisher, C., Plaze, M., Gay, O., ... Raznahan, A. (2016). Longitudinal stability of the folding pattern of the anterior cingulate cortex during development. *Developmental Cognitive Neuroscience, 19*, 122–127.

Cachia, A., Paillère-Martinot, M. L., Galinowski, A., Januel, D., de Beaurepaire, R., Bellivier, F., ... Martinot, J. L. (2008). Cortical folding abnormalities in schizophrenia patients with resistant auditory hallucinations. *NeuroImage, 39*(3), 927–935.

Cachia, A., Roell, M., Mangin, J. F., Sun, Z. Y., Jobert, A., Braga, L., ... Borst, G. (2017). How interindividual differences in brain anatomy shape reading accuracy. *Brain Structure and Function*, 1–12

Catts, H. W., Fey, M. E., Ellis Weismer, S., & Bridges, M. S.

(2014). The relationship between language and reading abilities. In J. B. Tomblin & M. A. Nippold (Eds.), *Understanding individual differences in language development across the school years* (pp. 144–165). New York: Psychology Press.

Clark, K. A., Helland, T., Specht, K., Narr, K. L., Manis, F. R., Toga, A. W., & Hugdahl, K. (2014). Neuroanatomical precursors of dyslexia identified from pre-reading through to age 11. *Brain, 137*(12), 3136–3141.

Cykowski, M. D., Kochunov, P. V., Ingham, R. J., Ingham, J. C., Mangin, J. F., Rivière, D., ... Fox, P. T. (2008). Perisylvian sulcal morphology and cerebral asymmetry patterns in adults who stutter. *Cerebral Cortex, 18*(3), 571–583.

Dehaene, S., Cohen, L., Morais, J., & Kolinsky, R. (2015). Illiterate to literate: Behavioural and cerebral changes induced by reading acquisition. *Nature Review Neuroscience, 16*(4), 234–244.

Dehaene-Lambertz, G. (2017). The human infant brain: A neural architecture able to learn language. *Psychonomic Bulletin and Review, 24*(1), 48–55.

Dehaene-Lambertz, G., & Spelke, E. S. (2015). The infancy of the human brain. *Neuron, 88*(1), 93–109.

DeWitt, I., & Rauschecker, J. P. (2012). Phoneme and word recognition in the auditory ventral stream. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 109*(8), E505–E514.

Dorsaint-Pierre, R., Penhune, V. B., Watkins, K. E., Neelin, P., Lerch, J. P., Bouffard, M., & Zatorre, R. J. (2006). Asymmetries of the planum temporale and Heschl's gyrus: Relationship to language lateralization. *Brain, 129*(5), 1164–1176.

Dubois, J., Benders, M., Borradori-Tolsa, C., Cachia, A., Lazeyras, F., Ha-Vinh Leuchter, R., ... Hüppi, P. S. (2008). Primary cortical folding in the human newborn: An early marker of later functional development. *Brain, 131*(8), 2028–2041.

Dubois, J., Benders, M., Cachia, A., Lazeyras, F., Ha-Vinh Leuchter, R., Sizonenko, S. V., ... Hüppi, P. S. (2008). Mapping the early cortical folding process in the preterm newborn brain. *Cerebral Cortex, 18*(6), 1444–1454.

Dubois, J., Hertz-Pannier, L., Cachia, A., Mangin, J. F., Le Bihan, D., & Dehaene-Lambertz, G. (2009). Structural asymmetries in the infant language and sensori-motor networks. *Cerebral Cortex, 19*(2), 414–423.

Dubois, J., Poupon, C., Thirion, B., Simonnet, H., Kulikova, S., Leroy, F., ... Dehaene-Lambertz, G. (2016). Exploring the early organization and maturation of linguistic pathways in the human infant brain. *Cerebral Cortex, 26*(5), 2283–2298.

Eckert, M. A., Galaburda, A. M., Karchemskiy, A., Liang, A., Thompson, P., Dutton, R. A., ... Reiss, A. L. (2006). Anomalous sylvian fissure morphology in Williams syndrome. *NeuroImage, 33*(1), 39–45.

Fahim, C., Yoon, U., Nashaat, N. H., Khalil, A. K., El-Belbesy, M., Mancini-Marie, A., ... Meguid, N. (2012). Williams syndrome: A relationship between genetics, brain morphology and behaviour. *Journal of Intellectual Disability Research, 56*(9), 879–894.

Geffroy, D., Rivière, D., Denghien, I., Souedet, N., Laguitton, S., & Cointepas, Y. (2011). *BrainVISA: A complete software platform for neuroimaging.* Paper presented at the Python in neuroscience workshop.

Gilmore, J. H., Lin, W. L., Prastawa, M. W., Looney, C. B., Vetsa, Y. S. K., Knickmeyer, R. C., ... Gerig, G. (2007). Regional gray matter growth, sexual dimorphism, and cerebral asymmetry in the neonatal Brain. *Journal of Neuroscience, 27*(6), 1255–1260.

Gullick, M. M., & Booth, J. R. (2015). The direct segment of the arcuate fasciculus is predictive of longitudinal reading change. *Developmental Cognitive Neuroscience, 13*, 68–74.

Habas, P. A., Scott, J. A., Roosta, A., Rajagopalan, V., Kim, K., Rousseau, F., ... Studholme, C. (2012). Early folding patterns and asymmetries of the normal human brain detected from in utero MRI. *Cerebral Cortex, 22*(1), 13–25.

Hagoort, P. (2014). Nodes and networks in the neural architecture for language: Broca's region and beyond. *Current Opinion in Neurobiology, 28*, 136–141.

Hamelin, L., Bertoux, M., Bottlaender, M., Corne, H., Lagarde, J., Hahn, V., ... Sarazin, M. (2015). Sulcal morphology as a new imaging marker for the diagnosis of early onset Alzheimer's disease. *Neurobiology of Aging, 36*(11), 2932–2939.

Harris, J. M., Moorhead, T. W. J., Miller, P., McIntosh, A. M., Bonnici, H. M., Owens, D. G. C., ... Lawrie, S. M. (2007). Increased prefrontal gyrification in a large high-risk cohort characterizes those who develop schizophrenia and reflects abnormal prefrontal development. *Biological Psychiatry, 62*(7), 722–729.

Hilgetag, C. C., & Barbas, H. (2005). Developmental mechanics of the primate cerebral cortex. *Anatomy and Embryology, 210*(5-6), 411–417.

Hill, J., Dierker, D., Neil, J., Inder, T., Knutsen, A., Harwell, J., ... van Essen, D. (2010). A surface-based analysis of hemispheric asymmetries and folding of cerebral cortex in term-born human infants. *Journal of Neuroscience, 30*(6), 2268–2276.

Hopkins, W. D., & Nir, T. M. (2010). Planum temporale surface area and grey matter asymmetries in chimpanzees (*Pan troglodytes*): The effect of handedness and comparison

with findings in humans. *Behavioural Brain Research, 208*(2), 436–443.

Im, K., Jo, H. J., Mangin, J. F., Evans, A. C., Kim, S. I., & Lee, J. M. (2010). Spatial distribution of deep sulcal landmarks and hemispherical asymmetry on the cortical surface. *Cerebral Cortex, 20*(3), 602–611.

Im, K., Lee, J. M., Jeon, S., Kim, J. H., Seo, S. W., Na, D. L., & Grant, P. E. (2013). Reliable identification of deep sulcal pits: The effects of scan session, scanner, and surface extraction tool. *PLoS One*, *8*(1), e53678.

Im, K., Pienaar, R., Lee, J. M., Seong, J. K., Choi, Y. Y., Lee, K. H., & Grant, P. E. (2011). Quantitative comparison and analysis of sulcal patterns using sulcal graph matching: A twin study. *NeuroImage, 57*(3), 1077–1086.

Im, K., Lee, J. M., Jeon, S., Kim, J. H., Seo, S. W., Na, D. L., & Grant, P. E. (2013). Reliable identification of deep sulcal pits: the effects of scan session, scanner, and surface extraction tool. *PloS One, 8*(1), e53678.

Im, K., Pienaar, R., Paldino, M. J., Gaab, N., Galaburda, A. M., & Grant, P. E. (2013). Quantification and discrimination of abnormal sulcal patterns in polymicrogyria. *Cerebral Cortex, 23*(12), 3007–3015.

Im, K., Raschle, N. M., Smith, S. A., Ellen Grant, P., & Gaab, N. (2016). Atypical sulcal pattern in children with developmental dyslexia and at-risk kindergarteners. *Cerebral Cortex, 26*(3), 1138–1148.

Kasprian, G., Langs, G., Brugger, P. C., Bittner, M., Weber, M., Arantes, M., & Prayer, D. (2011). The prenatal origin of hemispheric asymmetry: An in utero neuroimaging study. *Cerebral Cortex, 21*(5), 1076–1083.

Kates, W. R., Ikuta, I., & Burnette, C. P. (2009). Gyrification patterns in monozygotic twin pairs varying in discordance for autism. *Autism Research, 2*(5), 267–278.

Keller, S. S., Crow, T., Foundas, A., Amunts, K., & Roberts, N. (2009). Broca's area: Nomenclature, anatomy, typology and asymmetry. *Brain and Language, 109*(1), 29–48.

Kersbergen, K. J., Leroy, F., Išgum, I., Groenendaal, F., de Vries, L. S., Claessens, N. H. P., ... Benders, M. J. N. L. (2016). Relation between clinical risk factors, early cortical changes, and neurodevelopmental outcome in preterm infants. *NeuroImage, 142*, 301–310.

Klee, T., & Stokes, S. F. (2011). Language development. In *Child psychology and psychiatry* (pp. 45–50). Chichester: John Wiley & Sons.

Kochunov, P., Glahn, D. C., Fox, P. T., Lancaster, J. L., Saleem, K., Shelledy, W., ... Rogers, J. (2010). Genetics of primary cerebral gyrification: Heritability of length, depth and area of primary sulci in an extended pedigree of Papio baboons. *NeuroImage, 53*(3), 1126–1134.

Leroy, F., Cai, Q., Bogart, S. L., Dubois, J., Coulon, O., Monzalvo, K., ... Dehaene-Lambertz, G. (2015). New human-specific brain landmark: The depth asymmetry of superior temporal sulcus. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 112*(4), 1208–1213.

Leroy, F., Glasel, H., Dubois, J., Hertz-Pannier, L., Thirion, B., Mangin, J. F., & Dehaene-Lambertz, G. (2011). Early maturation of the linguistic dorsal pathway in human infants. *Journal of Neuroscience, 31*(4), 1500–1506.

Li, G., Guo, L., Nie, J. X., & Liu, T. M. (2010). An automated pipeline for cortical sulcal fundi extraction. *Medical Image Analysis, 14*(3), 343–359.

Li, G., Wang, L., Shi, F., Lyall, A. E., Lin, W., Gilmore, J. H., & Shen, D. (2014). Mapping longitudinal development of local cortical gyrification in infants from birth to 2 years of age. *Journal of Neuroscience, 34*(12), 4228–4238.

Libero, L. E., DeRamus, T. P., Deshpande, H. D., & Kana, R. K. (2014). Surface-based morphometry of the cortical architecture of autism spectrum disorders: Volume, thickness, area, and gyrification. *Neuropsychologia, 62*, 1–10.

Liebenthal, E., Desai, R., Ellingson, M. M., Ramachandran, B., Desai, A., & Binder, J. R. (2010). Specialization along the left superior temporal sulcus for auditory categorization. *Cerebral Cortex, 20*(12), 2958–2970.

Liu, T., Sachdev, P. S., Lipnicki, D. M., Jiang, J. Y., Geng, G. Q., Zhu, W. L., ... Wen, W. (2013). Limited relationships between two-year changes in sulcal morphology and other common neuroimaging indices in the elderly. *NeuroImage, 83*, 12–17.

Liu, T., Wen, W., Zhu, W. L., Kochan, N. A., Trollor, J. N., Reppermund, S., ... Sachdev, P. S. (2011). The relationship between cortical sulcal variability and cognitive performance in the elderly. *NeuroImage, 56*(3), 865–873.

Lohmann, G., von Cramon, D. Y., & Colchester, A. C. F. (2008). Deep sulcal landmarks provide an organizing framework for human cortical folding. *Cerebral Cortex, 18*(6), 1415–1420.

Lyttelton, O. C., Karama, S., Ad-Dab'bagh, Y., Zatorre, R. J., Carbonell, F., Worsley, K., & Evans, A. C. (2009). Positional and surface area asymmetry of the human cerebral cortex. *NeuroImage, 46*(4), 895–903.

Mahmoudzadeh, M., Wallois, F., Kongolo, G., Goudjil, S., & Dehaene-Lambertz, G. (2017). Functional maps at the onset of auditory inputs in very early preterm human neonates. *Cerebral Cortex, 27*(4), 2500–2512.

Mangin, J. F., Jouvent, E., & Cachia, A. (2010). In-vivo measurement of cortical morphology: Means and meanings. *Current Opinion in Neurology, 23*(4), 359–367.

Mangin, J. F., Rivière, D., Cachia, A., Duchesnay, E., Cointepas, Y., Papadopoulos-Orfanos, D., ... Régis, J.

(2004). A framework to study the cortical folding patterns. *NeuroImage, 23*, S129–S138.

Melbourne, A., Kendall, G. S., Cardoso, M. J., Gunny, R., Robertson, N. J., Marlow, N., & Ourselin, S. (2014). Preterm birth affects the developmental synergy between cortical folding and cortical connectivity observed on multimodal MRI. *NeuroImage, 89*, 23–34.

Meng, Y., Li, G., Lin, W. L., Gilmore, J. H., & Shen, D. G. (2014). Spatial distribution and longitudinal development of deep cortical sulcal landmarks in infants. *NeuroImage, 100*, 206–218.

Mirakhur, A., Moorhead, T. W. J., Stanfield, A. C., McKirdy, J., Sussmann, J. E. D., Hall, J., ... McIntosh, A. M. (2009). Changes in gyrification over 4 years in bipolar disorder and their association with the brain-derived neurotrophic factor valine 66 methionine variant. *Biological Psychiatry, 66*(3), 293–297.

Ochiai, T., Grimault, S., Scavarda, D., Roch, G., Hori, T., Riviere, D., ... Régis, J. (2004). Sulcal pattern and morphology of the superior temporal sulcus. *NeuroImage, 22*(2), 706–719.

Olulade, O. A., Napoliello, E. M., & Eden, G. F. (2013). Abnormal visual motion processing is not a cause of dyslexia. *Neuron, 79*(1), 180–190.

Panizzon, M. S., Fennema-Notestine, C., Eyler, L. T., Jernigan, T. L., Prom-Wormley, E., Neale, M., ... Kremen, W. S. (2009). Distinct genetic influences on cortical surface area and cortical thickness. *Cerebral Cortex, 19*(11), 2728–2735.

Penttilä, J., Paillére-Martinot, M. L., Martinot, J. L., Mangin, J. F., Burke, L., Corrigall, R., ... Cachia, A. (2008). Global and temporal cortical folding in patients with early-onset schizophrenia. *Journal of the American Academy of Child and Adolescent Psychiatry, 47*(10), 1125–1132.

Peterson, R. L., & Pennington, B. F. (2012). Developmental dyslexia. *The Lancet, 379*(9830), 1997–2007.

Platt, M. P., Adler, W. T., Mehlhorn, A. J., Johnson, G. C., Wright, K. A., Choi, R. T., ... Rosen, G. D. (2013). Embryonic disruption of the candidate dyslexia susceptibility gene homolog *Kiaa0319-like* results in neuronal migration disorders. *Neuroscience, 248*, 585–593.

Régis, J., Mangin, J. F., Ochiai, T., Frouin, V., Riviére, D., Cachia, A., ... Samson, Y. (2005). "Sulcal Root" generic model: A hypothesis to overcome the variability of the human cortex folding patterns. *Neurologia Medico-Chirurgica, 45*(1), 1–17.

Raschle, N. M., Becker, B. L. C., Smith, S., Fehlbaum, L. V., Wang, Y. Y., & Gaab, N. (2017). Investigating the influences of language delay and/or familial risk for dyslexia on brain structure in 5-year-olds. *Cerebral Cortex, 27*(1), 764–776.

Raschle, N. M., Chang, M., & Gaab, N. (2011). Structural brain alterations associated with dyslexia predate reading onset. *NeuroImage, 57*(3), 742–749.

Raschle, N. M., Stering, P. L., Meissner, S. N., & Gaab, N. (2014). Altered neuronal response during rapid auditory processing and its relation to phonological processing in prereading children at familial risk for dyslexia. *Cerebral Cortex, 24*(9), 2489–2501.

Saygin, Z. M., Osher, D. E., Norton, E. S., Youssoufian, D. A., Beach, S. D., Feather, J., ... Kanwisher, N. (2016). Connectivity precedes function in the development of the visual word form area. *Nature Neuroscience, 19*(9), 1250–1255.

Shim, G., Jung, W. H., Choi, J. S., Jung, M. H., Jang, J. H., Park, J. Y., ... Kwon, J. S. (2009). Reduced cortical folding of the anterior cingulate cortex in obsessive–compulsive disorder. *Journal of Psychiatry and Neuroscience, 34*(6), 443–449.

Shultz, S., Vouloumanos, A., Bennett, R. H., & Pelphrey, K. (2014). Neural specialization for speech in the first months of life. *Developmental Science, 17*(5), 766–774.

Skeide, M. A., Kraft, I., Müller, B., Schaadt, G., Neef, N. E., Brauer, J., ... Friederici, A. D. (2016). *NRSN1* associated grey matter volume of the visual word form area reveals dyslexia before school. *Brain, 139*(10), 2792–2803.

Striedter, G. F., Srinivasan, S., & Monuki, E. S. (2015). Cortical folding: When, where, how, and why?. *Annual Review of Neuroscience, 38*, 291–307.

Striem-Amit, E., Hertz, U., & Amedi, A. (2011). Extensive cochleotopic mapping of human auditory cortical fields obtained with phase-encoding FMRI. *PLoS One, 6*(3), e17832.

Sun, T., & Hevner, R. F. (2014). Growth and folding of the mammalian cerebral cortex: From molecules to malformations. *Nature Reviews Neuroscience, 15*(4), 217–232.

Sun, T., Patoine, C., Abu-Khalil, A., Visvader, J., Sum, E., Cherry, T. J., ... Walsh, C. A. (2005). Early asymmetry of gene transcription in embryonic human left and right cerebral cortex. *Science, 308*(5729), 1794–1798.

Sun, T., & Walsh, C. A. (2006). Molecular approaches to brain asymmetry and handedness. *Nature Reviews Neuroscience, 7*(8), 655–662.

Sun, Z. Y., Rivière, D., Poupon, F., Régis, J., & Mangin, J.-F. (2007). Automatic inference of sulcus patterns using 3D moment invariants. In N. Ayache, S. Ourselin, & A. Maeder (Eds.), *Medical image computing and computer-assisted intervention – MICCAI 2007* (Vol. 4791, pp. 515–522). Berlin, Heidelberg: Springer.

Takerkart, S., Auzias, G., Brun, L., & Coulon, O. (2017).

Structural graph-based morphometry: A multiscale searchlight framework based on sulcal pits. *Medical Image Analysis, 35*, 32–45.

Tallinen, T., Chung, J. Y., Rousseau, F., Girard, N., Lefèvre, J., & Mahadevan, L. (2016). On the growth and form of cortical convolutions. *Nature Physics, 12*(6), 588–593.

Trefler, A., Sadeghi, N., Thomas, A. G., Pierpaoli, C., Baker, C. I., & Thomas, C. (2016). Impact of time-of-day on brain morphometric measures derived from T_1-weighted magnetic resonance imaging. *NeuroImage, 133*, 41–52.

Vandermosten, M., Boets, B., Wouters, J., & Ghesquière, P. (2012). A qualitative and quantitative review of diffusion tensor imaging studies in reading and dyslexia. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews, 36*(6), 1532–1552.

Vandermosten, M., Vanderauwera, J., Theys, C., De Vos, A., Vanvooren, S., Sunaert, S., ... Ghesquière, P. (2015). A DTI tractography study in pre-readers at risk for dyslexia. *Developmental Cognitive Neuroscience, 14*, 8–15.

van Essen, D. C. (1997). A tension-based theory of morphogenesis and compact wiring in the central nervous system. *Nature, 385*(6614), 313–318.

Wallace, G. L., Robustelli, B., Dankner, N., Kenworthy, L., Giedd, J. N., & Martin, A. (2013). Increased gyrification, but comparable surface area in adolescents with autism spectrum disorders. *Brain, 136*(6), 1956–1967.

Wang, Y. Y., Mauer, M. V., Raney, T., Peysakhovich, B., Becker, B. L. C., Sliva, D. D., & Gaab, N. (2017). Development of tract-specific white matter pathways during early reading development in at-risk children and typical controls. *Cerebral Cortex, 27*(4), 2469–2485.

Weiner, K. S., Barnett, M. A., Lorenz, S., Caspers, J., Stigliani, A., Amunts, K., ... Grill-Spector, K. (2017). The cytoarchitecture of domain-specific regions in human high-level visual cortex. *Cerebral Cortex, 27*(1), 146–161.

Williams, V. J., Juranek, J., Cirino, P., & Fletcher, J. M. (2017). Cortical thickness and local gyrification in children with developmental dyslexia. *Cerebral Cortex*, doi: 10.1093/cercor/bhx001

Xia, Z. C., Hoeft, F., Zhang, L. J., & Shu, H. (2016). Neuroanatomical anomalies of dyslexia: Disambiguating the effects of disorder, performance, and maturation. *Neuropsychologia, 81*, 68–78.

Xu, G., Knutsen, A. K., Dikranian, K., Kroenke, C. D., Bayly, P. V., & Taber, L. A. (2010). Axons pull on the brain, but tension does not drive cortical folding. *Journal of Biomechanical Engineering, 132*(7), 071013.

Zilles, K., Armstrong, E., Schleicher, A., & Kretschmann, H.-J. (1988). The human pattern of gyrification in the cerebral cortex. *Anatomy and Embryology, 179*(2), 173–179.

Zilles, K., Palomero-Gallagher, N., & Amunts, K. (2013). Development of cortical folding during evolution and ontogeny. *Trends in Neurosciences, 36*(5), 275–284.

Application of sulcal morphometry analysis in cognitive neuroscience of language

CUI Xin[1]; SU Mengmeng[2]; SHU Hua[1]

([1] *State Key Laboratory of Cognitive Neuroscience and Learning, Beijing Normal University, Beijing* 100875, *China*)

([2] *College of Elementary Education, Capital Normal University, Beijing* 100048, *China*)

Abstract: Language was the most remarkable ability of human beings. Numerous neuroimaging studies attempted to investigate its neurophysiological basis. Recent findings of abnormal sulcal patterns in psychiatric syndromes and neurological disorders shed new light on the relationship between language ability and complicated morphology of cerebral cortex. Here we described the studies using sulcal morphometry analysis in cognitive neuroscience of language and outlined some possible research directions for further studies. Combining sulci quantification with multimodal data will contribute to a better understanding of the neural mechanisms of language ability.

Key words: language-cognition; sulcus; disorder